

## SP-Creep 시험기법에 의한 9Cr강의 크리프 손상과 경도 특성

백승세\* · 류대영\*\* · 김정기\*\*\* · 권일현\*\*\*\* · 정세희\*\*\*\* · 유효선†

### Creep Damage and Hardness Properties for 9Cr Steel by SP-Creep Test Technique

Seung-Se Baek, Dae-Young Lyu, Jeong-Ki Kim,  
Il-Hyun Kwon, Se-Hee Chung and Hyo-Sun Yu

**Key Words:** SP-Creep Test(소형편치-크리프 시험), High Temperature Creep Property(고온 크리프 특성), Creep Curve(크리프 곡선), Rupture Time(파단시간), Power Law(멱수법칙), Load Exponent(하중지수), Activation Energy(활성화에너지), LMP(Larson-Miller Parameter), Micro Vicker's Hardness(미소 비커스 경도), 9Cr Steel

#### Abstract

It has recently been raised main issue how solve the problem of insufficient energy. One of the solution is to increase the thermal efficiency of power generation system. For the purpose of high efficiency, it is necessary to increase the steam temperature and pressure. So, the use of modified 9~12%Cr steel having superior creep rupture strength and oxidation resistance is required to endure such severe environment. The evaluation of creep properties of those heat resistance material is very important to secure the reliability of high temperature and pressure structural components. Since creep properties are determined by microstructural change such as carbide precipitation and coarsening, It is certain that there are some relationship between creep properties and hardness affected by microstructure. In this study, SP-Creep ruptured test for newly developed 9Cr steel being used as boiler valve material was performed, and creep properties of the material were evaluated. Also, hardness test were performed and hardness results were related to the creep properties such as LMP and creep strength to verify the availability of SP-Creep test as creep test method.

#### 1. 서론

최근 부족한 에너지를 해결하기 위한 일환으로, 발전소의 고 효율화가 추진 중에 있으며, 이

러한 고 효율화를 위해서는 증기압과 증기온도의 상승이 필수적이다. 따라서 고온·고압 환경에서 견딜 수 있는 내열재료의 개발이 주요한 관건이 되고 있다. 현재까지는 발전소 운전온도인 538℃~566℃에서 크리프 강도, 내산화성, 내부식성이 우수한 9~12Cr 강이 널리 사용되어져 왔다<sup>(1)</sup>. 그러나 지금까지 사용되어 왔던 9~12Cr 강은 593℃ 이상의 온도에서는 낮은 크리프 파단강도를 보이기 때문에, 최근 열효율을 높이기 위한 운전 온도의 상승으로 인해 기존 9~12Cr 강을 개량하여 사용하기 위한 연구가 진행되어오고 있다.<sup>(2,3)</sup> 국내에서도 기존의 9Cr강에 V 및 Nb를 첨가하고,

\* 회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 회원, 전주공업대학 정밀기계공학과

\*\*\* 회원, 전주공업대학 기계과

\*\*\*\* 회원, 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학부,  
자동차신기술연구소

E-mail : yuhs@moak.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2346 FAX : (063)270-2388

**Table 1.** Chemical compositions of 9Cr1MoVNb steel. (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	N	Nb	Fe
0.095	0.411	0.589	0.018	0.004	0.166	8.42	0.897	0.195	0.001	0.04	0.075	bal.

NT(normalizing + tempering) 강화열처리를 행하여 크리프 특성을 개선한 9Cr1MoVNb 강이 개발되어 발전소 고온·고압 밸브에 적용하기 위해 준비중에 있다.<sup>(4)</sup>

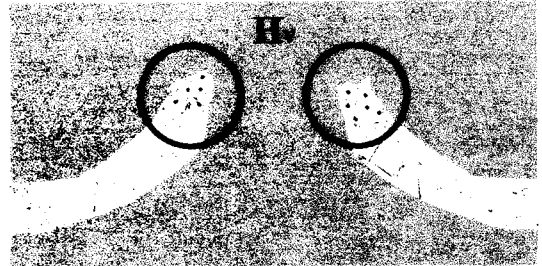
새로이 개발되는 9~12Cr 강의 요구조건으로 ORNL(Oak Ridge National Lab.), EPRI 및 JWS에서는 보일러 부재의 경우 크리프 단면수축율이 75%이상, 터빈 부재의 경우는 600℃, 100,000hrs 크리프 파단 강도가 127MPa이상, 크리프 연신율은 최소 10%이상으로 규정하고 있다. 이렇듯 크리프 특성은 고온·고압용 내열재료의 개발 시에 매우 중요시되는 평가 기준이므로 새로이 개발중인 내열재료의 고온 크리프 특성 평가는 고온·고압 설비부재의 신뢰성을 확보하기 위해 중요하다고 말할 수 있다.

한편, 가혹한 환경하에서 장시간 운전되는 설비부재들은 미세조직의 변화, 탄화물의 석출 및 조대화 그리고 전위의 발생 등으로 내크리프 성질이 운전시간과 함께 변화한다. 또한 경도는 미세조직 및 탄화물의 변화에 영향을 받으므로 운전시간에 따라 변화하는 크리프 특성과 경도사이에는 정량적 상관관계가 존재할 것이라 예상할 수 있다. 최근, 사용이 간편하고 비파괴적인 경도법을 이용하여 크리프 특성을 예측하기 위해, 이러한 두 인자사이의 정량적인 관계에 대한 연구가 진행되어, 크리프 강도 및 평균사용시간의 예측, 잔여수명평가 등에 이용되고 있다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서는 발전설비 고온·고압용 밸브로 개발중인 국산 내열강을 대상으로 SP-Creep 시험을 수행하여 크리프 특성을 평가하였다. 또한 비파괴적인 경도시험법을 통하여 얻은 크리프 파단부의 경도특성과 SP-Creep 시험 결과사이의 정량적인 상관관계를 조사함으로써 크리프 손상평가를 위한 기초적인 경도시험결과에 대해 검토하였다.

## 2. 실험재료와 실험방법

### 2.1 실험재료 및 시험편



**Fig. 1** Indented position for micro Vicker's hardness test

본 연구에서 적용된 실험재료는 고온·고압용 밸브 재료로 국내에서 개발된 9Cr 주조강재의 신재이며, Table 1에 이에 대한 화학적 조성을 나타내었다. SP-Creep 시험에 사용된 시험편의 치수는 10×10×0.5mm이며, 표면 조도에 의한 시험결과 오차를 방지하기 위하여 모든 시험편은 #2000까지의 연마지로 마무리하였다.

### 2.2 실험방법

SP-Creep 시험은 본 대학에서 자체 설계하여 구성한 SP-Creep 전용시험기<sup>(6)</sup>에서 수행되어졌다. 본 연구의 9Cr 강재의 SP-Creep 시험은 발전설비 운전온도(566℃)보다 높은 온도인 575℃~650℃의 온도범위에서 수행하였으며, SP-Creep 시험편에는 20kg~75kg의 하중이 가해졌다. SP-Creep 시험은 시험편이 매우 박편이므로 시험도중 산화에 의한 시험결과 오차를 방지하기 위하여 Argon분위기에서 수행되었다.

시험이 완료된 시험편은 SEM을 이용하여 파단면을 관찰하였으며, 관찰 후에 Fig. 1과 같이 시험편을 절단하여 수지마운팅한 후 미소 비커스 경도기를 이용하여 경도를 측정하였다. 비커스 경도 측정시의 하중은 200g이었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 SP-Creep 곡선 거동

Fig. 2는 9Cr강의 신재를 대상으로 650℃에서

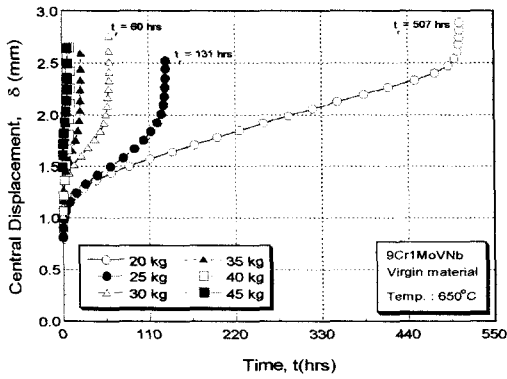


Fig. 2 The SP-Creep curves for virgin material of 9Cr steel at 650°C

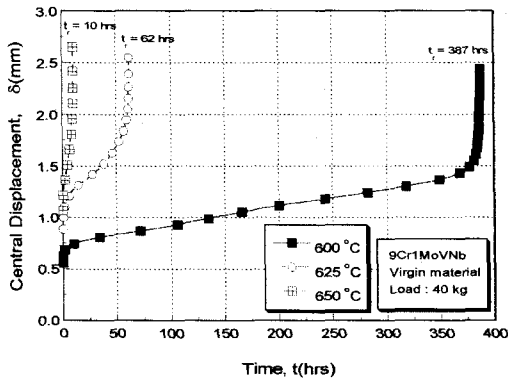


Fig. 3 The SP-Creep curves for virgin material of 9Cr steel at 40kg

하중을 변화시켜 수행하여 얻어진 SP-Creep곡선이며, Fig. 3은 하중 40kg에서 온도변화에 따른 크리프 곡선의 거동을 보여주고 있다. 두 그림에서 보이는 바와 같이 미소시험편을 이용한 SP-Creep 시험으로부터 얻어진 크리프 곡선은 전형적인 크리프 3단계 거동과 함께 시험온도 및 외력에 대하여 뚜렷한 변화를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 Creep 변위와 정규화된(normalized) 시간사이의 관계를 나타낸 그림이다. 여기서 Creep 변위는 중앙변위에서 초기변위값을 뺀 값이고, 정규화된 시간은 크리프 시간을 각각의 파단시간으로 나눈 값이다. 하중이 감소함에 따라 크리프 변위는 증가되고 있으며, 정상상태 크리프 영역이 증가되고 있음을 관찰할 수 있다. SP-Creep 시험 파괴과정을 보면, 1차 크리프 말기에 미세한 표면균열이 발생하여, 정상상태 크리프 동안에

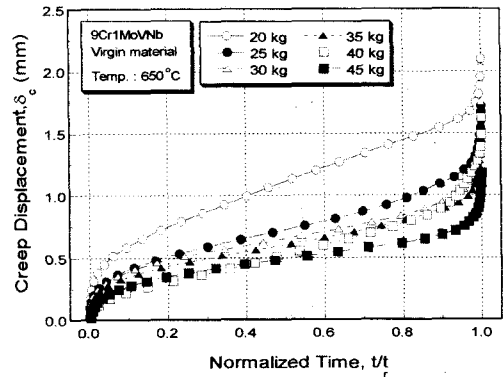


Fig. 4 The Creep strain behavior according to load fraction at 650°C

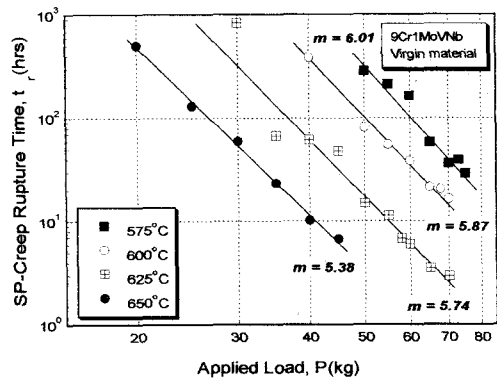


Fig. 5 The power law relationship in terms of rupture time for 9Cr steel

이러한 균열들이 성장, 합체하고 3단계 크리프에서 최종적인 파단에 이른다. 즉, 크리프가 진행되는 동안 하중을 지지하는 면적이 감소하게 되고, 그러한 면적이 어느 순간 작용된 하중을 지지할 수 없는 임계면적에 도달하게 되면 파단이 발생하게 된다. 따라서, 하중이 감소할수록 균열의 진전속도는 느리게 되며, 임계면적의 감소와 더불어 파단시까지 균열이 진행해야할 변위가 늘어나게 된다. 결국, 하중이 감소함에 따라 균열진전속도의 감소로 인해 정상상태 크리프 영역이 증가되었으며, 파단까지의 균열진행변위의 증가로 크리프 변위가 증가하게 되는 것이다.

### 3.2 파단시간에 의한 Power Law 관계

크리프 시험에서 외력과 파단시간과는 멱수법칙의 관계가 존재한다고 알려져 있다. Fig. 5는

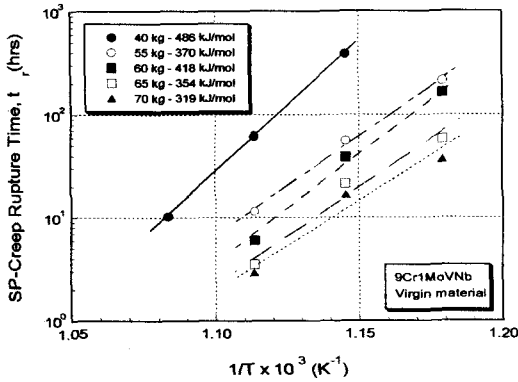


Fig. 6 The Arrhenius relationship in terms of rupture time for virgin material of 9Cr steel

작용하중과 파단시간의 역수법칙의 관계를 보여 주고 있다. SP-Creep 실험으로부터 얻어진 작용하중과 파단시간과의 역수법칙의 관계는 각 온도별로 다음과 같이 나타내어진다. 여기서  $t_r$ 은 파단시간,  $P$ 는 작용하중(kg)이다.

$$\begin{aligned}
 575^\circ\text{C} : t_r &= 7.21 \times 10^{14} P^{-6.10} \\
 600^\circ\text{C} : t_r &= 1.00 \times 10^{12} P^{-5.88} \\
 625^\circ\text{C} : t_r &= 1.01 \times 10^{11} P^{-5.75} \\
 650^\circ\text{C} : t_r &= 4.85 \times 10^9 P^{-5.38}
 \end{aligned} \quad (1)$$

하중지수값의 거동을 보면 기준 단축인장 크리프 시험에서의 응력지수의 거동과 같이 온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있다. 일반적으로 역수법칙 관계에서 지수값은 재료의 강화효과와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 외부 환경에 의한 고용체 원소의 강화효과 및 미세 조직의 열적 안정성이 저하하면 크리프 시험에서의 지수값이 감소한다. SP-Creep 시험에서도 마찬가지로 온도가 증가함에 따라 탄화물과 조직의 열적 안정성이 저하하게 되어 하중지수가 감소하게 된 것으로 생각된다.

### 3.3 SP-Creep 파단시간과 활성화에너지

일반적으로 크리프 파단 시간은 외력이 일정할 때 온도의 증가에 따라 지수적으로 증가하게 되며, 이러한 온도에 따른 크리프의 열적활성화의 거동은 다음과 같은 Arrhenius-type 식에 의해 정

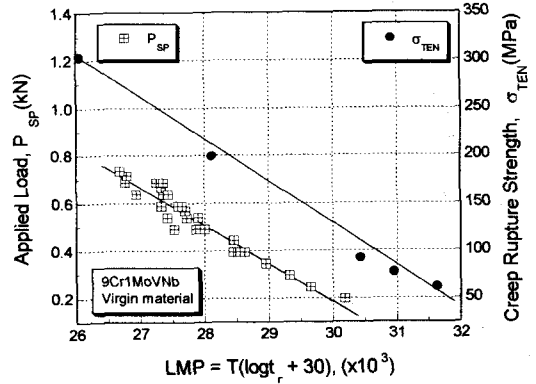


Fig. 7 The relationship between applied load and Larson-Miller Parameter with NRIM creep data for 9Cr steel

리되어진다.

$$t_r = A \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서  $A$ 는 상수,  $Q$ 는 활성화에너지(kJ/mol),  $R$ 은 일반기체상수(8.314J/mol·K) 그리고  $T$ 는 온도(K)이다.

Fig. 6은 온도와 파단시간과의 Arrhenius 관계를 나타낸 그림이다. 보이는 바와 같이 SP-Creep 시험에서도 온도와 파단시간과의 Arrhenius 관계를 확인할 수 있었다. 본 연구에서 얻어진 9Cr강의 활성화 에너지의 값은 40kg~70kg의 범위에서 319kJ/mol~486kJ/mol의 값을 얻을 수 있었으며, 하중의 증가에 따라 활성화에너지는 전반적으로 감소하는 거동을 확인할 수 있었다.

### 3.4 크리프 하중과 Larson-Miller Parameter 관계

Fig. 7은 SP-Creep 시험으로부터 얻어진 Larson-Miller Parameter(LMP)를 작용하중에 대하여 나타낸 그림이다. 인장 크리프 시험과의 비교를 위해 NRIM 데이터도 함께 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 인장 크리프 시험에서의 결과와 마찬가지로 SP-Creep 시험의 작용하중과 LMP사이에는 일정한 상관 관계가 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서 얻어진 9Cr강의 신재에 대하여 작용된 하중,  $P_{sp}$ (kN)와 LMP사이에는 다음과 같은 관계를 얻을 수 있었다.

$$P_{SP} = 5.01 - 0.16 \cdot [LMP \times 10^{-3}] \quad (3)$$

여기서,  $LMP = T(\log t_r + 30)$

한편 NRIM 데이터로부터 단축 인장 크리프 파단강도,  $\sigma_{TEN}$ (MPa)과 LMP 사이에는 다음과 같은 관계가 보여진다.

$$\sigma_{TEN} = 1462.3 - 44.4 \cdot [LMP \times 10^{-3}] \quad (4)$$

본 연구의 하중영역에서 구해진 식 (3)과 (4)에서 LMP값이 같다고 놓고,  $\sigma_{TEN}$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma_{TEN} = 78.18 + 276.3 P_{SP} \quad (5)$$

식 4로부터, 본 연구의 시험조건에서 동일한 LMP값을 갖는 SP-Creep 시험에서의 하중(kN)과 단축 인장 크리프 시험에서의 응력(MPa)사이에는 약 276배의 관계가 있음을 알 수 있다.

### 3.5 경도와 LMP의 관계

재료의 미세 조직적인 변화는 그 재료의 크리프 강도, 인장강도, 경도 등의 재료의 특성을 변화시키며 재료내에 고용되어있는 Cr, Mo, V와 같은 원소의 탄화물들은 전위운동을 방해하여 소성 변형에 영향을 주게 된다. 따라서 크리프 강도와 경도는 탄화물에 의해 야기되는, 전위 운동에 대한 저항성을 나타내는 인자로서 이들 두 인자 사이의 관계가 정리된다면, 비교적 간편하고 비파괴적인 경도를 측정함으로써 크리프 강도를 평가할 수 있게 된다.

Fig. 8은 9Cr강의 신재를 대상으로 SP-Creep 파단시험을 실시한 몇몇 시험체에 대한 경도결과를 나타낸 것이다. 경도 측정위치는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 파단면 부근을 대상으로 하였다. 단축 인장크리프 시험에서는 LMP값이 증가함에 따라 경도 값이 감소한다고 보고되었으며<sup>(5)</sup>, 그림에서 보는 바와 같이 SP-Creep 시험을 통한 경도의 결과도 LMP가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있어 SP-Creep 시험의 유용성을 확인할 수 있었다. 여기서 LMP 증가에 따른 경도의 감소는 고온에서 장시간 변형에 따른 탄화물의 석출 및 조

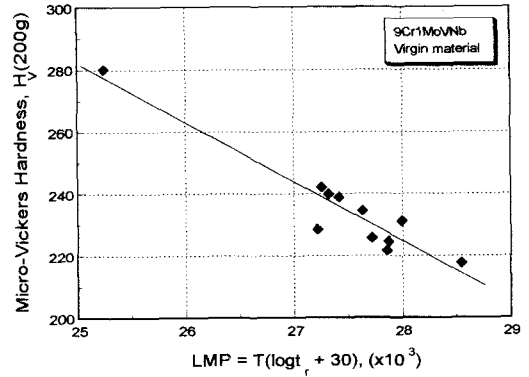


Fig. 8 The relationship between micro-Vickers hardness and Larson-Miller parameter

대화에 의한 현상으로 생각된다. 본 연구에서는 경도와 LMP사이에는 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있었다.

$$H_V = 763.9 - 19.264 \cdot [LMP \times 10^{-3}] \quad (6)$$

식 (3)과(4) 및 식 (6)로 부터 SP-Creep 시험으로부터 얻어진 경도와 하중( $P_{SP}$ ) 및 인장 크리프 시험에서의 크리프 강도( $\sigma_{TEN}$ )사이의 관계는 다음과 같이 표현되어진다.

$$P_{SP} = -1.37 + 9.31 \times 10^{-3} \cdot H_V \quad (7)$$

$$\sigma_{TEN} = -299.7 + 2.31 \cdot H_V \quad (8)$$

이상과 같은 시험결과 즉, 경도 vs. LMP 및 경도 vs. 부하외력 사이의 상관관계는 SP-Creep 시험결과의 유효성을 뒷받침해주는 또 하나의 중요한 시험결과로 사료된다. 향후 충분한 데이터가 확보된다면, 앞에서 제시한 평가 과정 및 시험결과들은 현재 사용중에 있는 실기부재의 평균 사용온도, 크리프 강도 및 손상을 예측하는데 있어 그 유용성이 클 것으로 판단되며, 본 대학에서는 다양한 강종에 대해 이에 대한 연구가 진행중에 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 발전소 고온·고압 밸브재료로 국내에서 개발된 9Cr1MoVNB 강 신재에 대한

SP-Creep 시험을 수행하여 크리프 특성을 평가하였으며, 비파괴적인 정도법을 이용하여 크리프 특성과의 관계를 살펴보았다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 9Cr강의 신재에 대한 SP-Creep 곡선 거동은 크리프 하중 및 온도에 따라 명확하게 의존하며 하중이 감소할수록 정상상태 영역의 증가와 함께 크리프 변위가 증가하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 이유는 하중의 감소에 따른 임계 단면적의 감소로 인해 발생한 결과로 생각된다.

(2) SP-Creep 시험에서 과단시간은 부하하중과 역수법칙의 관계가 성립하였으며, 본 연구의 온도범위인 575°C~650°C에서 5.38~6.10의 하중지수 값을 보였으며, 온도의 증가에 따른 하중지수의 감소 경향을 확인할 수 있었다.

(3) SP-Creep 시험에서의 하중과 온도의 관계로부터 Arrhenius의 관계를 확인할 수 있었다. 9Cr의 SP-Creep 시험으로부터 얻어진 활성화 에너지는 40kJ/mol~50kJ/mol의 범위에서 319kJ/mol~486kJ/mol의 값을 보였다.

(4) 9Cr강의 SP-Creep 시험에 의한 LMP는 작용 하중사이의 관계를 살펴보았으며, 일정한 상관관계를 확인할 수 있었다. 또한 단축 인장 크리프 시험결과와의 관계로부터 SP-Creep 시험에서의 하중(kN)은 단축 인장크리프시험에서의 응력(MPa)과 약 276배의 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

(5) SP-Creep 시험 후 과단부의 정도값은 LMP와 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었으며, 기존의 단축 인장 크리프시험에서의 정도의 거동과 같이 LMP의 증가에 따라 감소하는 결과를 보였다. 또한 SP-Creep 시험을 통한 정도결과와 LMP사이의 정량적인 관계를 얻을 수 있었다.

### 참고문헌

(1) T. Fujita, Y. Nakabayashi, 1986, "Proceeding of COST-EPRI Workshop about 9-12% Cr Steel for Power Generation," Schaffhausen, Schweiz

(2) U. E. Klotz, C. Solenthaler, 1999, "Alloy

Composition and Mechanical Properties of 9-12% Chromium steels with martensitic-austenitic microstructure," *Materials Science & Eng.*, A272, pp. 292-299

(3) N. Parvathavarthini, S. Saroja, R.K. Dayal, 1999, "Influence of microstructure on the hydrogen permeability of 9%Cr-1%Mo ferritic steel," *Journal of Nuclear Materials*, 264, pp. 35-47

(4) 홍경태, 도정만, 1999, "고온고압용 9Cr1MoVNb 주강밸브의 실용화 개발," 한국과학기술연구원보고서

(5) 이해무, 남승훈, 백운봉, 1999, "고온기기 요소의 손상평가를 위한 정도측정법," 한국표준과학연구원보고서

(6) 유효선, 이송인, 백승세 외 3인, 특허출원, 2000, "소형편치-크리프 시험기 및 고온부재의 크리프 특성 평가 방법," 제 10-2000-0024756호.